

Pedro Gabriel Bastos Gonçalves

**INTEGRAÇÃO MEF-MED APLICADA À SIMULAÇÃO DE
DESESTABILIZAÇÕES DE ENCOSTAS**

Trabalho de Conclusão de Curso
(Bacharelado em Geologia)



UFRJ
2010



Pedro Gabriel Bastos Gonçalves

**INTEGRAÇÃO MEF-MED APLICADA À SIMULAÇÃO DE
DESESTABILIZAÇÕES DE ENCOSTAS**

Trabalho de Conclusão de Curso de
Graduação em Geologia do Instituto de
Geociências, Universidade Federal do
Rio de Janeiro – UFRJ, apresentado
como requisito necessário para obtenção
do grau de Bacharel em Geologia.

Orientadora: Andrea Ferreira Borges

Co-orientador: Marcello Goulart Teixeira

Rio de Janeiro
Dezembro de 2010

GONÇALVES, P. G. B.

Integração MEF-MED Aplicada à Simulação de Desestabilizações de Encostas. / Pedro Gabriel Bastos Gonçalves – Rio de Janeiro: UFRJ / Igeo, 2010. xii, 23 p.: Il.; 30 cm

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geologia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia, 2010.

Orientadora: Andrea Ferreira Borges

1. Geologia. 2. Geologia de Engenharia – Trabalho de Conclusão de Curso. I. Borges, A. F. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia. III. Integração MEF-MED Aplicada à Simulação de Desestabilizações de Encostas.

Pedro Gabriel Bastos Gonçalves

INTEGRAÇÃO MEF-MED APLICADA À SIMULAÇÃO DE DESESTABILIZAÇÕES DE ENCOSTAS

Trabalho de Conclusão de Curso de
Graduação em Geologia do Instituto de
Geociências, Universidade Federal do
Rio de Janeiro – UFRJ, apresentado
como requisito necessário para obtenção
do grau de Bacharel em Geologia.

Orientadora: Andrea Ferreira Borges

Co-orientador: Marcello Goulart Teixeira

Aprovada em:

Por:

Andrea Ferreira Borges (UFRJ)

Marcello Goulart Teixeira (UFRJ)

Emílio Velloso Barroso (UFRJ)

UFRJ
Rio de Janeiro
2010

Aos meus pais, Marcia e
Paulo, e à minha noiva,
Aline.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus orientadores, Andrea Ferreira Borges e Marcello Goulart Teixeira, pelos conhecimentos repassados durante a elaboração deste trabalho.

RESUMO

GONÇALVES, Pedro Gabriel Bastos. **Integração MEF-MED Aplicada à Simulação de Desestabilizações de Encostas**. 2010. xii, 23p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geologia) – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

Uma maneira de resolver problemas de engenharia é a simulação, que pode ser feita com modelos virtuais ou reais. Uma melhor aproximação da realidade é alcançada através do uso de modelos reais. No entanto, este procedimento é caro e, algumas vezes, tecnicamente impraticável. A alternativa é a simulação usando modelos virtuais, onde diversos testes podem ser feitos à um custo relativamente baixo. Um dos métodos numéricos mais utilizados em simulação computacional é o Método dos Elementos Finitos (MEF). No entanto, o MEF não é apropriado para a simulação de sistemas onde os efeitos de descontinuidades micro-mecânicas na geometria devem ser levados em conta. O objetivo deste trabalho é a simulação de desestabilizações de encostas e das tensões provocadas pelo impacto de fragmentos de rochas de granulometrias variadas, consideradas aqui como elementos discretos circulares, sobre um muro de impacto, através da integração MEF-MED.

Palavras-chave: Método dos Elementos Finitos, Método dos Elementos Discretos, Desestabilização de encostas.

ABSTRACT

GONÇALVES, Pedro Gabriel Bastos. **MEF-MED INTEGRATION APPLIED FOR THE SIMULATION OF SLOPES DESTABILIZATION**. 2010. xii, 23p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geologia) – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

One way to solve engineering problems is the simulation that can be done with real or virtual models. A better approximation of reality is achieved through the use of real models. However this procedure is costly and in some situations it is technically impractical. The alternative is the simulation using virtual models, where several tests can be performed at a relatively low cost. One of the most used numerical methods in computer simulation is the Finite Element Method (FEM). However, the FEM is not suitable for the simulation of systems where the effects of micro-mechanical discontinuity of the geometry should be taken into account. The objective of this work is the simulation of slopes destabilization and of the tensions caused by the impact of rock fragments, here as circular discrete elements, on a beam through the FEM-DEM integration.

Keywords: Finite Elements Method, Discrete Elements Method, Slopes Destabilization.

SUMÁRIO

Agradecimentos	vi
Resumo	vii
Abstract	viii
Sumário	ix
Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivo	4
2 METODOLOGIA	5
2.1 Conceitos Básicos Sobre o Método dos Elementos Discretos	5
2.1.1 Detecção de Colisão	5
2.1.2 Força de Contato Normal e Força de Contato Tangencial	6
2.2 Conceitos Básicos Sobre o Método dos Elementos Finitos	7
2.2.1 Formulação Matricial e Integração no Tempo	8
2.3 Integração MEF-MED	9
3 RESULTADOS	10
4 CONCLUSÕES	21
5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	22

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Principais medidas para redução de danos provocados por quedas de blocos em encostas (Spang, 1987).	3
Figura 2.1: Vizinhança entre células.	6
Figura 2.2: Colisão entre pinballs e elementos discretos (Teixeira <i>et al.</i> , 2010). ..	9
Figura 3.1: Simulação com muro a 0,2m e blocos de 5 a 15cm em $t = 0s$	10
Figura 3.2: Simulação com muro a 0,2m e blocos de 5 a 15cm em $t = 0,5s$	11
Figura 3.3: Simulação com muro a 0,2m e blocos de 5 a 15cm em $t = 1s$	11
Figura 3.4: Simulação com muro a 0,2m e blocos de 5 a 15cm em $t = 2s$	12
Figura 3.5: Variação das tensões ao longo de 2 segundos de simulação no nó inferior direito da malha de elementos finitos com blocos de 5 a 15cm e muro a 0,2m.	12
Figura 3.6: Variação das tensões ao longo de 2 segundos de simulação no nó inferior esquerdo da malha de elementos finitos com blocos de 5 a 15cm e muro a 0,2m.	13
Figura 3.7: Simulação com muro a 0,5m e blocos de 5 a 15cm em $t = 0s$	13
Figura 3.8: Simulação com muro a 0,5m e blocos de 5 a 15cm em $t = 0,5s$	14
Figura 3.9: Simulação com muro a 0,5m e blocos de 5 a 15cm em $t = 1s$	14
Figura 3.10: Simulação com muro a 0,5m e blocos de 5 a 15cm em $t = 2s$	15
Figura 3.11: Variação das tensões ao longo de 2 segundos de simulação no nó inferior direito da malha de elementos finitos com blocos de 5 a 15cm e muro a 0,5m.	15
Figura 3.12: Variação das tensões ao longo de 2 segundos de simulação no nó inferior esquerdo da malha de elementos finitos com blocos de 5 a 15cm e muro a 0,5m.	16
Figura 3.13: Simulação com muro a 1m e blocos de 5 a 15cm em $t = 0s$	17
Figura 3.14: Simulação com muro a 1m e blocos de 5 a 15cm em $t = 0,5s$	17
Figura 3.15: Simulação com muro a 1m e blocos de 5 a 15cm em $t = 1s$	18

Figura 3.16: Simulação com muro a 1m e blocos de 5 a 15cm em $t = 2s$ 18

Figura 3.17: Variação das tensões ao longo de 2 segundos de simulação no nó inferior direito da malha de elementos finitos com blocos de 5 a 15cm e muro a 1m. 19

Figura 3.18: Variação das tensões ao longo de 2 segundos de simulação no nó inferior esquerdo da malha de elementos finitos com blocos de 5 a 15cm e muro a 1m. 19

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Tipos de movimentos de massa (adaptada de Chorley <i>et al.</i> , 1984, IPT, 1989, Fernandes e Amaral, 1996).	2
Tabela 1: Comparação entre as máximas tensões de tração (em MPa).	20

1 INTRODUÇÃO

Uma encosta, segundo definição da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), é o trecho inclinado de uma elevação natural. As desestabilizações de encostas podem provocar graves acidentes quando o material desprendido atinge áreas ocupadas, causando prejuízos de ordem social e econômica.

Aos movimentos de solo, rocha e/ou sedimentos por ação principalmente da gravidade dá-se o nome de Movimento de Massa. Esse é o principal processo de retirada do material liberado pelo intemperismo para sua posterior incorporação pelos agentes transportadores.

A estabilidade ou instabilidade de uma encosta depende da interação de um conjunto de fatores. O ângulo de repouso, ou seja, o maior ângulo de inclinação em que o material na encosta permanecerá estático sem rolar morro abaixo, é definido principalmente pelos seguintes fatores: natureza do material, a quantidade de água infiltrada nos materiais, a inclinação da encosta e presença de vegetação. Em materiais inconsolidados o ângulo de repouso médio é de aproximadamente 30° , mas o valor deste ângulo varia em função do tamanho, forma e grau de seleção do material. A estabilidade de encostas com materiais consolidados depende de outros fatores, como estrutura da rocha (fraturas, acamamento, etc.) e posição das estruturas em relação ao relevo. Além do tipo de material, outro fator que afeta o ângulo de repouso das encostas é a quantidade de água infiltrada.

A inclinação da encosta é um fator de estabilidade muito importante. Isso porque com o aumento da inclinação da encosta aumenta o efeito da força de gravidade em relação à força de atrito. Desta forma, quanto maior a inclinação encosta maior a tendência de movimento dos materiais sobre ela.

A presença de vegetação é um fator adicional que define a condição de estabilidade das encostas. As raízes das árvores aumentam a coesão do solo, aumentando o seu ângulo de repouso. A perda dessa cobertura vegetal, por sua

vez, modifica as condições de estabilidade da encosta. O resultado final é normalmente um acentuamento da erosão das encostas e o aumento do potencial para movimentos rápidos na mesma.

Os tipos de movimento de massa são classificados de acordo com a geometria do movimento, tipo de material envolvido e velocidade do movimento. A tabela 1 é um resumo das principais classificações de movimentos de massa.

Tabela 2: Tipos de movimentos de massa (adaptada de Chorley *et al.*, 1984, Fernandes e Amaral, 1996).

Tipo de Movimento		Características do Movimento
Rastejos (Creep)		Movimento lento, ocorre em declives acima de 35°, deslocando porção superior do solo, atingindo baixa profundidade. Possui gradiente vertical de velocidade (maior próximo à superfície).
Escorregamentos (Slide)	Deslizamentos	Envolvem participação da água. Ocorrem em relevos de elevada amplitude, com presença de manto regolítico. Causados por elevada pluviosidade e antropismo. Envolvem fragmentos de rochas (rockslides) e solos (landslides).
Corridas de Massa (Flow)		Participação intensa de água, forte caráter hidrodinâmico. O transporte é feito por suspensão ou saltação. A separação entre água e carga sólida é dificultada.
Queda de Blocos (Fall)		Movimentos desenvolvidos em declives bastante acentuados. Queda livre de material rochoso. Ação maior da gravidade.

As principais técnicas empregadas nas intervenções para redução dos danos provocados pelas desestabilizações de encostas incluem medidas de remoção do material instável, estabilização com estruturas ativas ou passivas e

medidas de convivência, através da construção de túneis falsos ou muros de impacto. A figura 1.1 ilustra os principais métodos de restrição dos danos provocados por eventos de queda de blocos ou pequenos volumes de solo, entre os quais incluem-se as barreiras.

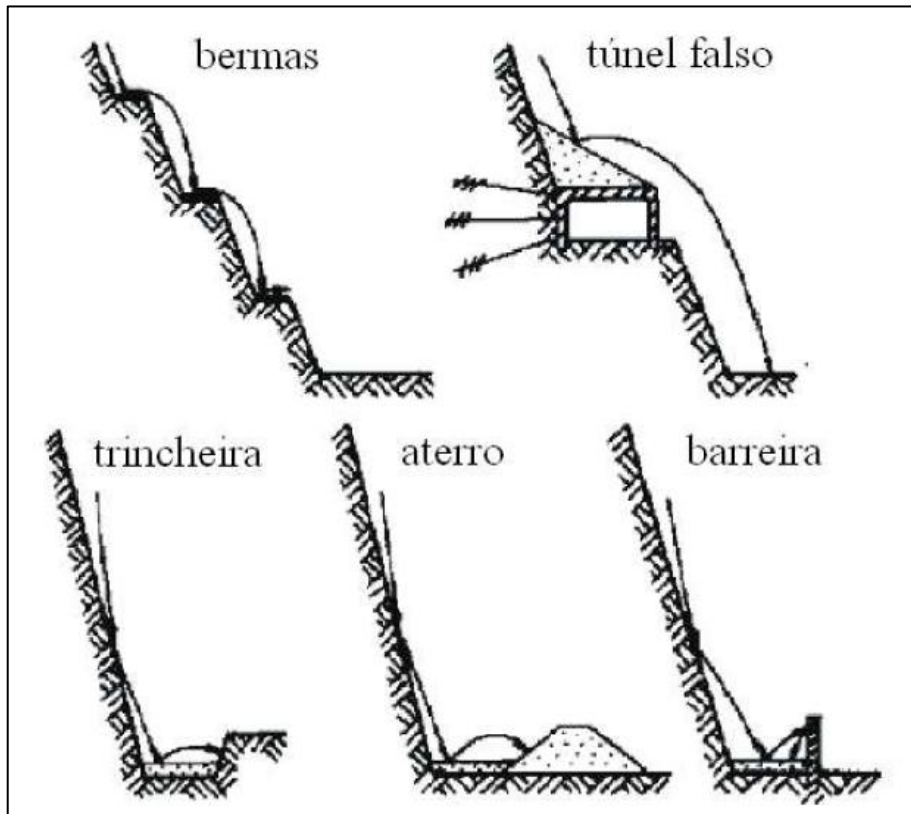


Figura 1.1: Principais medidas para redução de danos provocados por quedas de blocos em encostas (Spang, 1987).

As barreiras podem ser muros rígidos (muros de impacto), barreiras flexíveis ou estruturas semi-rígidas, construídas para conter fragmentos de rocha ou um volume limitado de solo que se desprendam da encosta, acumulando-se em uma região entre a barreira e a encosta. Tais estruturas são projetadas para resistir ao impacto do material e sua altura deve ultrapassar a altura alcançada pelos blocos. A zona de acumulação deve ter espaço suficiente para acomodar todo o material desestabilizado em um evento. Após cada evento o material deve ser removido da zona de acumulação para evitar que o volume útil seja reduzido para o próximo evento.

Para o projeto de um muro de impacto é necessária uma análise de estabilidade da encosta em questão, onde são estimados o volume de material

que pode se desprender da encosta, a trajetória de queda deste material e a energia cinética do material ao se chocar com o muro. A norma brasileira NBR 11682 (ABNT,1991) determina que, para o dimensionamento de um muro de impacto, os parâmetros a serem considerados são: o fator de armazenamento total, que é função do volume de acumulação a ser contido pelo muro e do volume deslocável pela instabilização; o coeficiente de impacto sobre o muro; o peso, a forma e a trajetória de queda do material desprendido; a frequência de quedas; o tempo de utilidade dos muros e previsão de sua recomposição. A norma sugere valores para o projeto com base no risco de instabilidade e no grau de segurança necessário ao local.

Segundo Kohler (2009), a largura da zona de acumulação e a altura do muro devem ser determinadas por métodos numéricos que simulem a energia e a trajetória do material em movimento.

Uma maneira de resolver problemas de engenharia é a simulação, que pode ser feita com modelos virtuais ou reais. Uma melhor aproximação da realidade é alcançada através do uso de modelos reais. No entanto, este procedimento é caro e, algumas vezes, tecnicamente impraticável. A alternativa é a simulação usando modelos virtuais, onde diversos testes podem ser feitos a um custo relativamente baixo.

1.1 Objetivo

O objetivo deste trabalho é realizar simulações numéricas em duas dimensões de desestabilizações de encostas e das tensões provocadas pelo impacto de fragmentos de rochas de granulometrias variadas, consideradas aqui como elementos discretos circulares, sobre um muro de impacto, através da integração do Método dos Elementos Discretos (MED) com o Método dos Elementos Finitos (MEF).

2 METODOLOGIA

2.1 Conceitos Básicos Sobre o Método dos Elementos Discretos

O Método dos Elementos Discretos (MED) é um método numérico para o cálculo da dinâmica de um sistema formado por uma grande quantidade de partículas, normalmente modeladas por geometrias simples, como esferas ou círculos. O algoritmo de solução consiste em realizar a checagem de contatos para posteriormente calcular as forças resultantes das colisões. A partir destas forças e de outras, como a força gravitacional e a de atrito com o ar, pode-se calcular a velocidade e a posição das partículas.

A proposta do MED é modelar o material granular por meio de um conjunto de partículas discretas, cujo comportamento é governado por leis físicas. A configuração do meio estudado é investigada para cada intervalo de tempo definido para a análise. Em função das ações atuantes nas partículas em um determinado instante determina-se a configuração do instante de tempo seguinte, e assim, uma vez investigadas as peculiaridades de cada intervalo de tempo, determina-se o comportamento dinâmico do meio estudado. As ações atuantes podem ser implementadas para situações diversas e estas refletem o fenômeno físico analisado (Nascimento *et al.*, 2007).

O problema proposto neste trabalho foi modelado através do *software* Visualizador de Elementos Discretos (VISED), desenvolvido pelos alunos do Instituto Militar de Engenharia (IME) Kin Kunihiro Minato e Camillo Vianna Cantini como parte do projeto de Iniciação Tecnológica (Minato e Cantini, 2009).

A seguir serão abordados alguns conceitos básicos do MED.

2.1.1 Detecção de Colisão

Esta etapa do método visa identificar os elementos em contato para que na etapa seguinte sejam calculadas as forças geradas nessas colisões. Por se tratarem de problemas dinâmicos, onde uma grande quantidade de elementos

pode se mover livremente, uma grande quantidade de processamento é exigida durante a detecção de colisão. Em alguns casos esta etapa pode representar mais de 60% do tempo de processamento (Munjiza, 2004).

Neste trabalho foi implementado o algoritmo Munjiza-NBS (Munjiza, 2004), cujo tempo de processamento e uso de memória é linear em relação ao número de elementos. Este algoritmo baseia-se na divisão do espaço em células quadradas de tamanhos iguais. O comprimento do lado das células deve ser escolhido de forma que qualquer elemento possa estar totalmente contido em uma célula, ou seja, o lado da célula é igual ao diâmetro do círculo que circunscreve o maior elemento.

Diz-se que um elemento pertence a uma célula quando esta contém o centro do elemento. Assim, pode-se determinar a que célula um dado elemento pertence conhecendo apenas a sua posição. Além disso, pode-se garantir que dois elementos pertencentes a células que não sejam vizinhas nunca estarão em contato. Na prática, basta verificar as células vizinhas mostradas na Figura 2.1, já que a cada iteração, todas as células testarão suas vizinhas, de forma que para cada célula serão realizados os testes necessários.

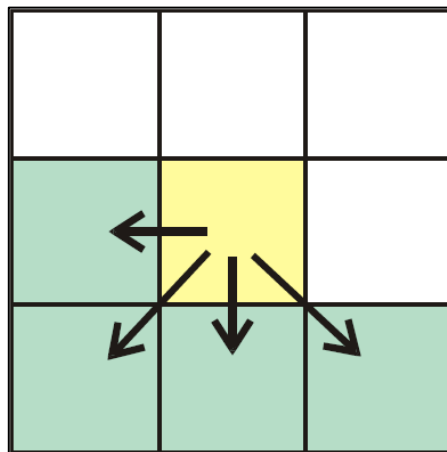


Figura 2.1: Vizinhança entre células.

2.1.2 Força de Contato Normal e Força de Contato Tangencial

Nesse trabalho considera-se que as colisões entre os objetos geram forças normais aos elementos, aplicadas nas regiões de contato, sendo considerado o modelo de amortecimento linear (Pöschel, 2005), que estabelece que a

intensidade da força normal atuante F_n em função dos parâmetros de rigidez normal k_n e de amortecimento c_n , além do valor da interpenetração u_n e da velocidade relativa normal v_n , pode ser dada com boa aproximação por:

$$F_n = k_n u_n + c_n v_n$$

A força tangencial é determinada segundo o modelo de Cundall & Strack (1979), que estabelece que essa força é dada pelo menor valor entre a força visco-elástica na direção tangencial e a força de atrito, sendo esta última determinada pelo produto do coeficiente de atrito entre partículas μ com a força de contato na direção normal F_n . A energia elástica tangencial armazenada durante o tempo de contato, dada por $k_t \int v_t dt$, compõe, juntamente com a parcela de amortecimento na direção tangencial, dada por $v_t c_t$, o valor da força viscoelástica. Os valores da velocidade relativa tangencial v_t , rigidez tangencial k_t e do amortecimento tangencial c_t são responsáveis por este efeito. Logo, a força tangencial oriunda do contato entre partículas é expressa por:

$$F_t = \min \{k_t \int v_t dt + v_t c_t, F_n \mu\}$$

2.2 Conceitos Básicos Sobre o Método dos Elementos Finitos

No âmbito da Engenharia de Estruturas (Azevedo, 2003), o Método dos Elementos Finitos (MEF) tem como objetivo a determinação do estado de tensão e de deformação de um sólido de geometria arbitrária sujeito a ações externas. Este tipo de cálculo tem a designação genérica de análise de estruturas e surge, por exemplo, no estudo de edifícios, pontes, barragens, etc.

A abordagem do MEF aqui utilizada é a mesma dos trabalhos de Zienkiewicz & Taylor (1991) e Soriano (2003), onde foi formulado o modelo de deslocamentos para o problema do estado plano de tensões e de deformações utilizando elementos triangulares de três pontos nodais e dois graus de liberdade por nó. Para a discretização temporal foi utilizado o algoritmo SS22 de Zienkiewicz.

2.2.1 Formulação Matricial e Integração no Tempo

Após a discretização usual pelo Método dos Elementos Finitos, obtém-se a seguinte formulação matricial para o problema de vibração: dados $\{u_0\}$ e $\{\dot{u}_0\}$, respectivamente posição inicial e velocidade inicial nos nós da malha, determinar o vetor de deslocamentos $\{u\}$ tal que

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F\}$$

onde $[M]$ é a matriz de massa, $[K]$ a matriz de rigidez e a matriz de amortecimento $[C]$ é considerada como uma combinação linear das outras duas matrizes.

O algoritmo SS22 utilizado neste trabalho, descrito por Zienkiewicz (1991), é um método de passo simples baseado no Método dos Resíduos Ponderados aplicável a equações de segunda ordem e é similar, em desempenho ao Método de Newmark: dados $\{u_n\}$ e $\{\dot{u}_n\}$, respectivamente deslocamento e velocidade nos nós da malha no instante n ,

$$u_{n+1} = u_n + \Delta t \dot{u}_n + \frac{1}{2} \Delta t^2 \alpha$$

e

$$\dot{u}_{n+1} = \dot{u}_n + \Delta t \alpha$$

com o vetor α sendo obtido como solução da equação

$$[M]\{\alpha\} + [C]\{\dot{u}_n + \theta_1 \Delta t \alpha\} + [K]\{u_n + \theta_1 \Delta t \dot{u}_n + \frac{1}{2} \theta_2 \Delta t^2 \alpha\} = \{F\}$$

Para obter-se estabilidade incondicional os parâmetros utilizados foram $\theta_1 = \theta_2 = 1/2$.

2.3 Integração MEF-MED

A integração entre os métodos foi feita utilizando o Método das Pinballs, que consiste em realizar o cálculo da interpenetração apenas em elementos circulares embutidos nos elementos da superfície ou contorno da malha de elementos finitos (Figura 2.1). Estas “pinballs” não possuem massa e suas posições e velocidades são calculadas a partir das posições e velocidades nodais. As forças resultantes das colisões com outras pinballs ou com elementos discretos são transferidas aos nós da malha de elementos finitos.

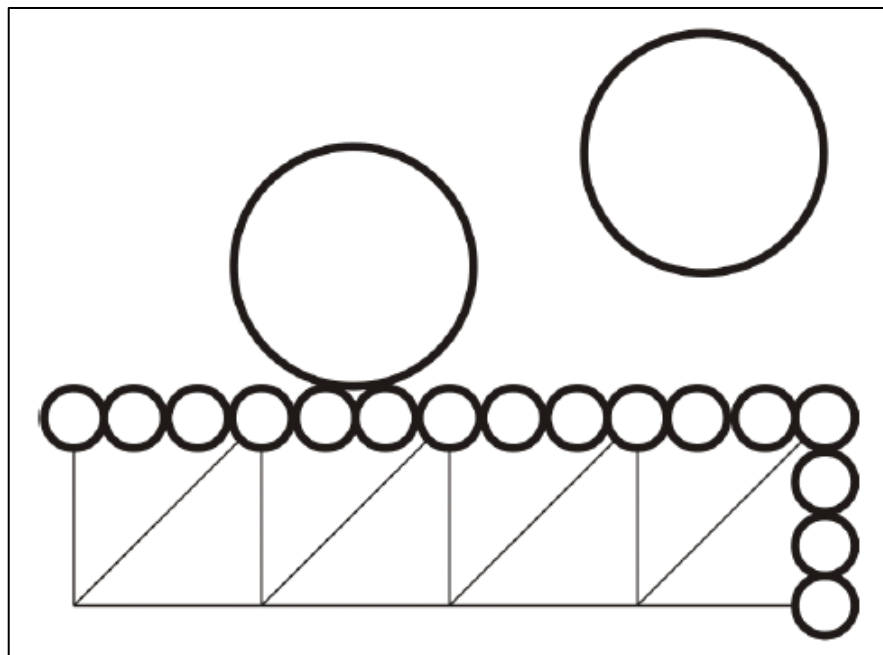


Figura 3.2: Colisão entre pinballs e elementos discretos (Teixeira *et al.*, 2010).

Para alcançar o objetivo deste trabalho foi utilizado um *software* denominado Solid-FDEM. Em seu atual estágio de desenvolvimento, o *software* é capaz de realizar simulações de carregamentos estáticos e dinâmicos em corpos de material isotrópico com elasticidade linear utilizando o MEF. Desta forma, foi feita a verificação da implementação do método por meio da simulação de problemas com solução analítica. Além disso, o programa efetua os cálculos relativos a colisão entre elementos discretos e entre elementos discretos e elementos finitos, esta última ao considerar as pinballs no contorno da malha de elementos finitos.

3 RESULTADOS

Um muro de impacto de seção transversal trapezoidal e constante, de material homogêneo, é submetido ao impacto gerado pela colisão de fragmentos de rochas com densidade $\rho_R = 2600\text{kg/m}^3$ e coeficiente de atrito $\mu_R = 0,8$. Considera-se o muro de concreto com altura $h = 1\text{m}$, base $B = 0,5\text{m}$ e largura do topo $b = 0,3\text{m}$, densidade $\rho_M = 2400\text{kg/m}^3$, módulo de elasticidade $E = 30\text{GPa}$ e coeficiente de poisson $\nu = 0,8$, discretizado com 240 elementos finitos T3. Estes dados foram obtidos de Teixeira *et al.* (2010).

O concreto é um material relativamente frágil, cuja resistência à tração (entre 2 e 4Mpa) é muito menor que a resistência à compressão simples (entre 30 e 50MPa). Portanto, sua resistência ao impacto está diretamente relacionada à resistência à tração.

Foram feitas simulações com blocos de diâmetros de 5 a 15cm uniformemente distribuídos e com o muro de impacto colocado a 0,2m, 0,5m e 1m de distância da base do talude.

Na primeira simulação, o muro de impacto foi colocado a 0,2m de distância da base do talude e submetido ao impacto de blocos de 5 a 15cm. As figuras 3.1 a 3.4 mostram o resultado da simulação em $t = 0\text{s}$, $t = 0,5\text{s}$, $t = 1,0\text{s}$, $t = 2,0\text{s}$.

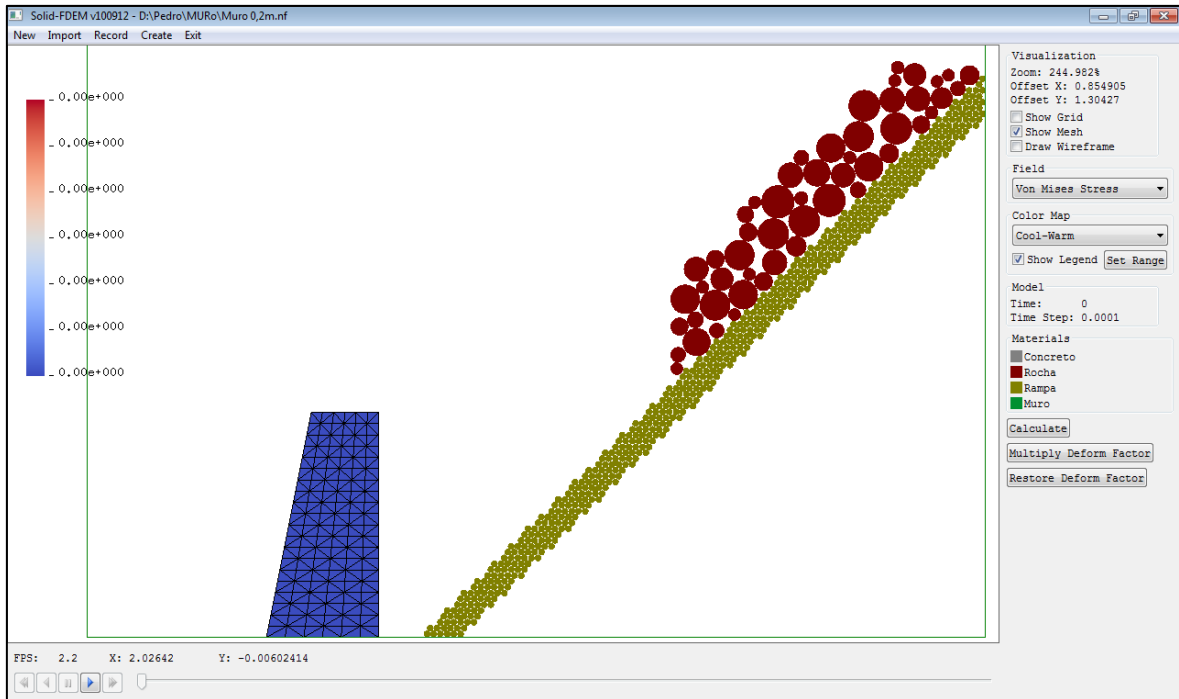


Figura 3.1: Simulação com muro a 0,2 m e blocos de 5 a 15 cm em $t = 0$ s.

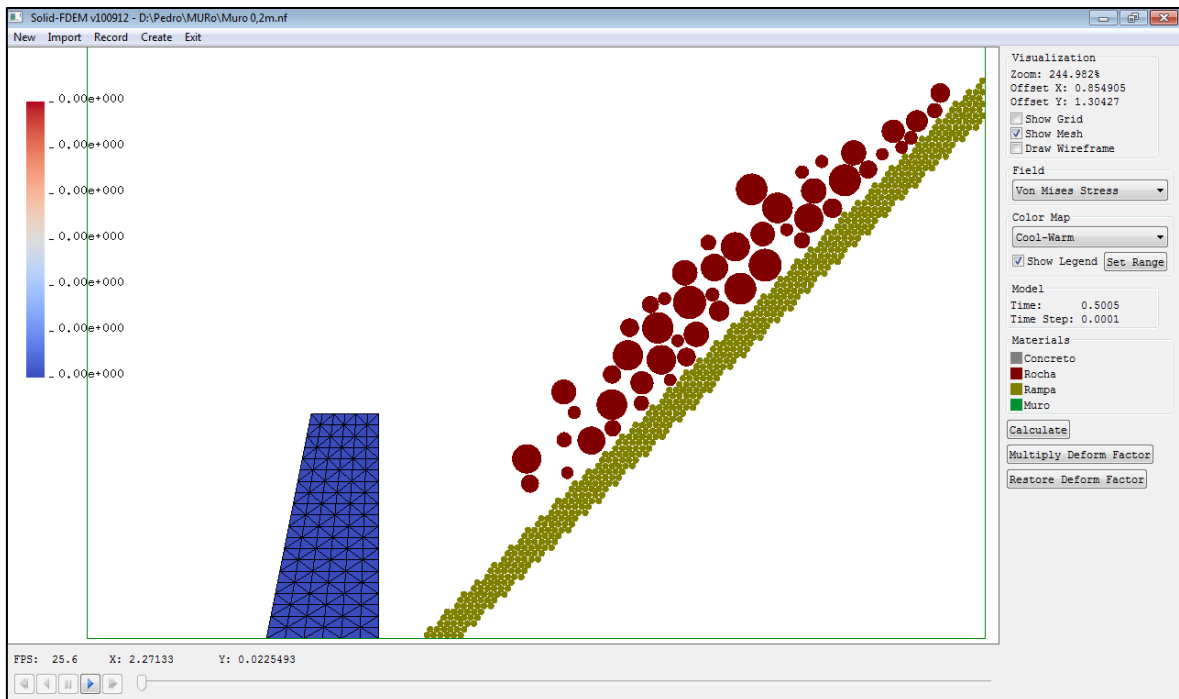


Figura 3.2: Simulação com muro a 0,2 m e blocos de 5 a 15 cm em $t = 0,5$ s.

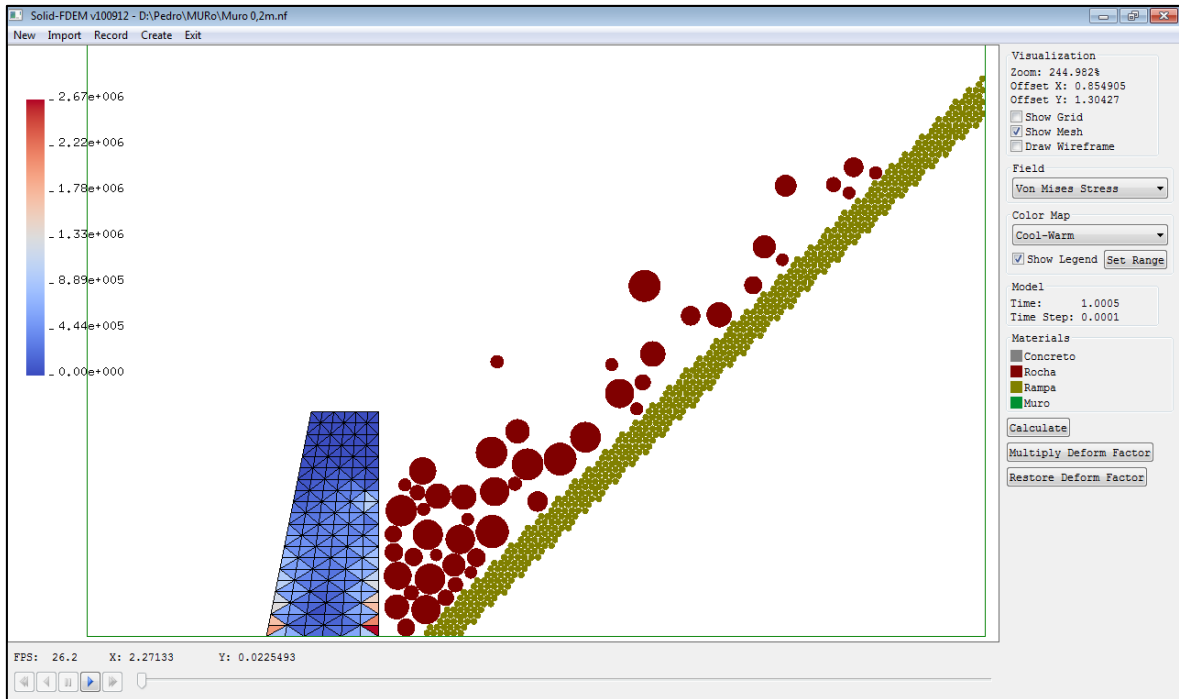


Figura 3.3: Simulação com muro a 0,2 cm e blocos de 5 a 15 cm em $t = 1$ s.

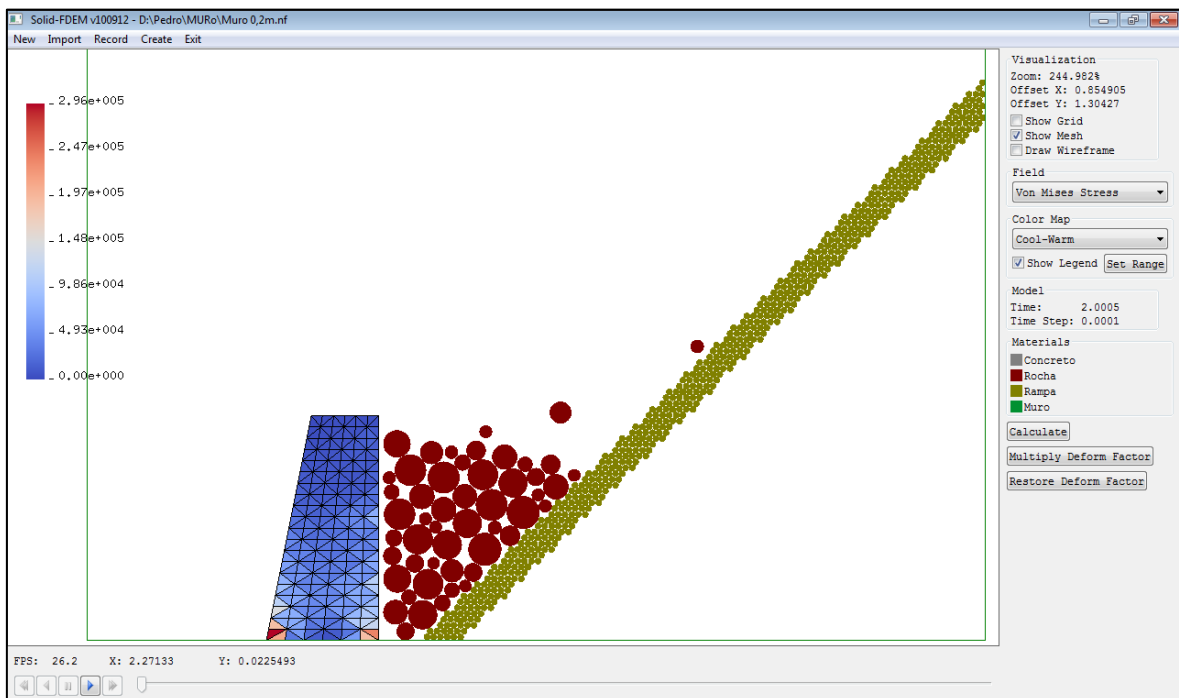


Figura 3.4: Simulação com muro a 0,2 m e blocos de 5 a 15 cm em $t = 2$ s.

As figuras 3.5 e 3.6 apresentam a variação das tensões S_x , S_y , S_{xy} e de von Mises nos nós inferiores direito e esquerdo da malha de elementos finitos,

respectivamente, onde os valores positivos estão associados às tensões de tração e os valores negativos às de compressão.

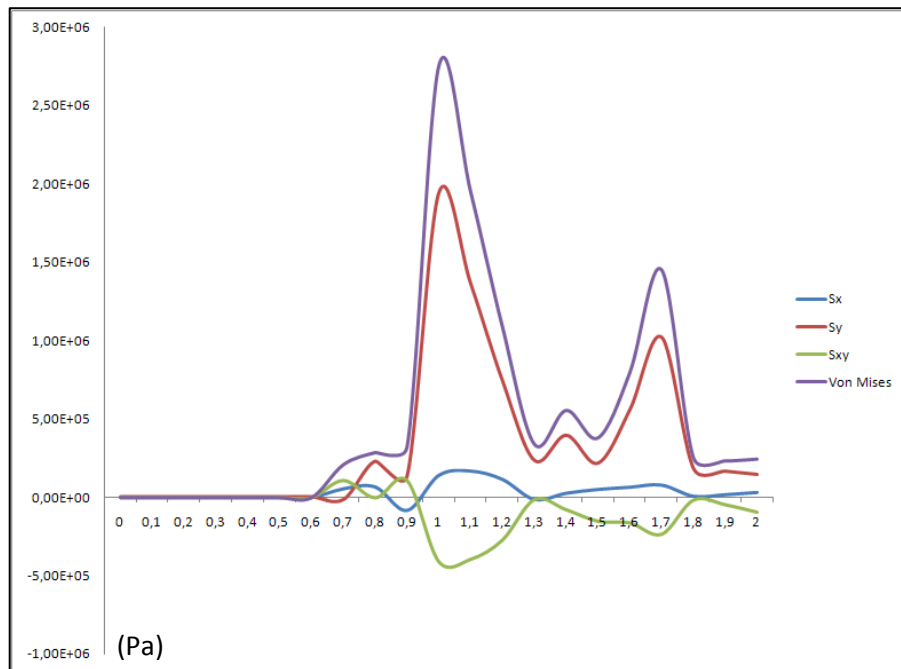


Figura 3.5: Variação das tensões ao longo de 2 segundos de simulação no nó inferior direito da malha de elementos finitos com blocos de 5 a 15cm e muro a 0,2m.

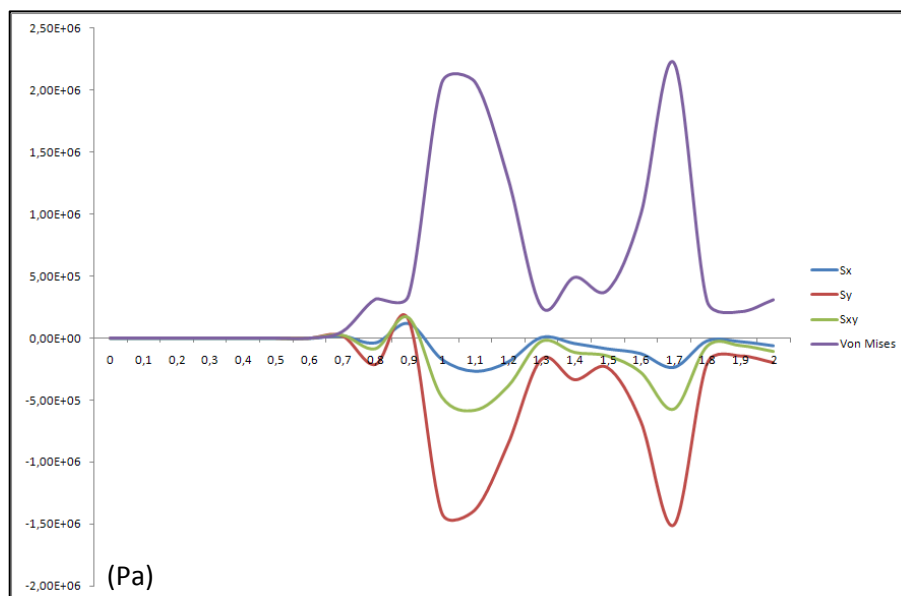


Figura 3.6: Variação das tensões ao longo de 2 segundos de simulação no nó inferior esquerdo da malha de elementos finitos com blocos de 5 a 15cm e muro a 0,2m.

Para a segunda simulação o muro foi colocado a 0,5m da encosta. O resultado é mostrado nas figuras 3.5 a 3.8.

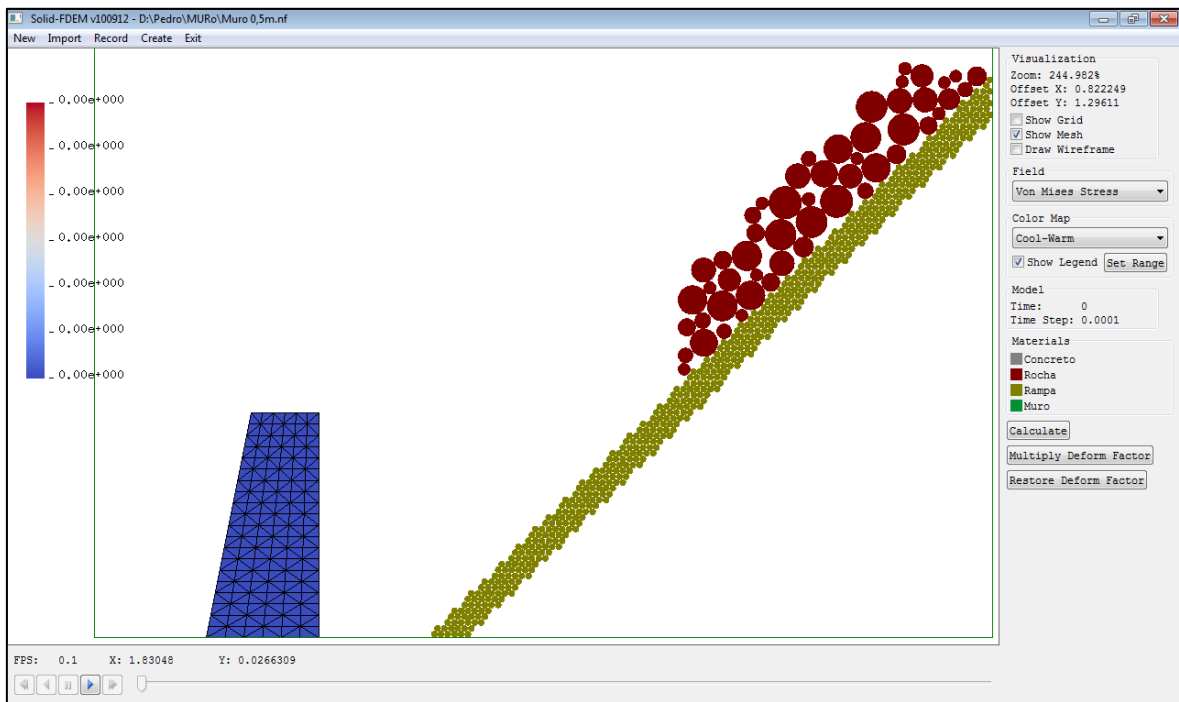


Figura 3.7: Simulação com o muro a 0,5m e blocos de 5 a 15cm em $t = 0s$.

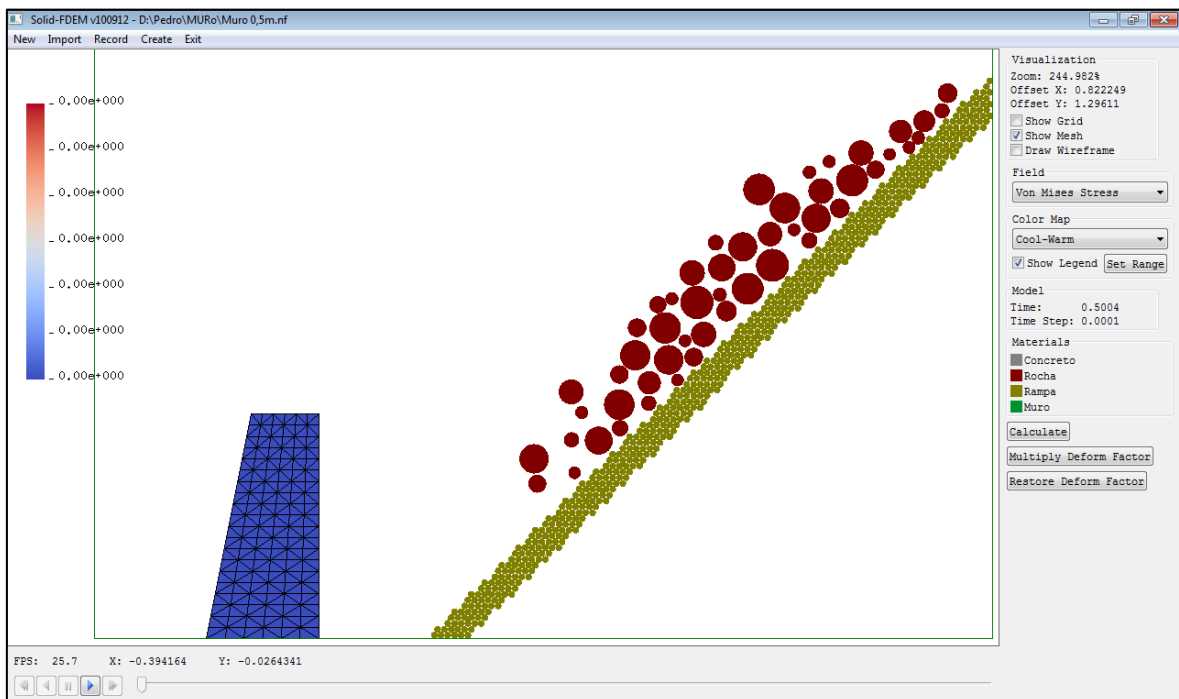


Figura 3.8: Simulação com o muro a 0,5m e blocos de 5 a 15cm em $t = 0,5s$.

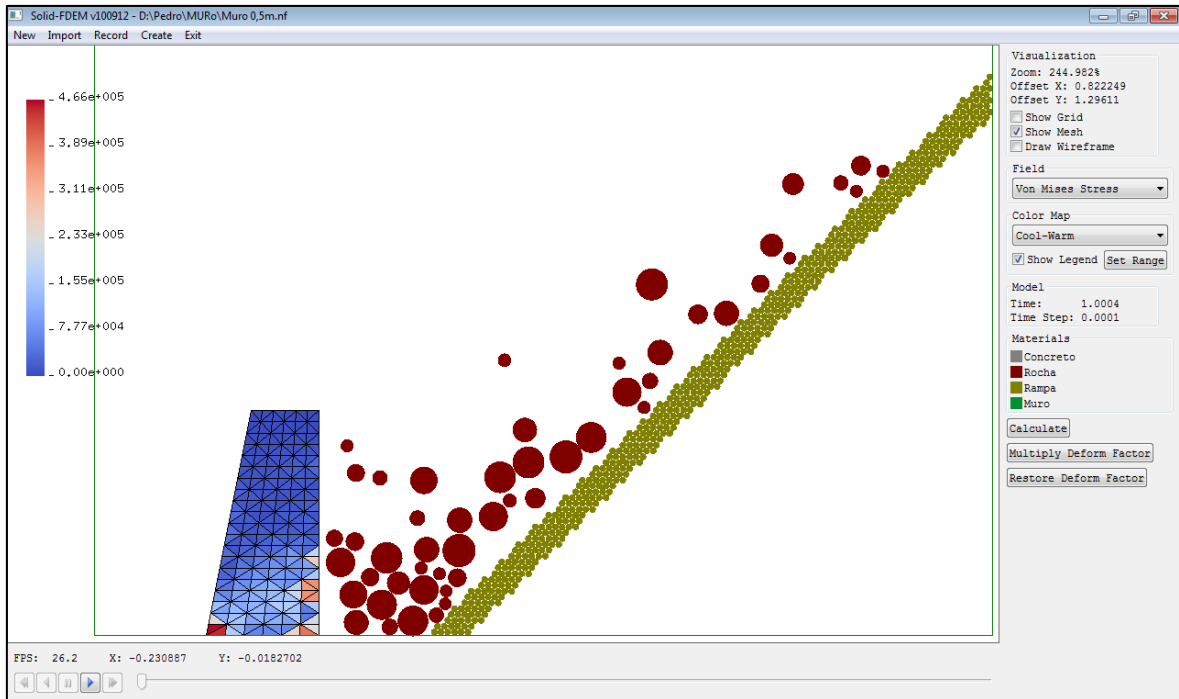


Figura 3.9: Simulação com o muro a 0,5m e blocos de 5 a 15cm em $t = 1,0s$.

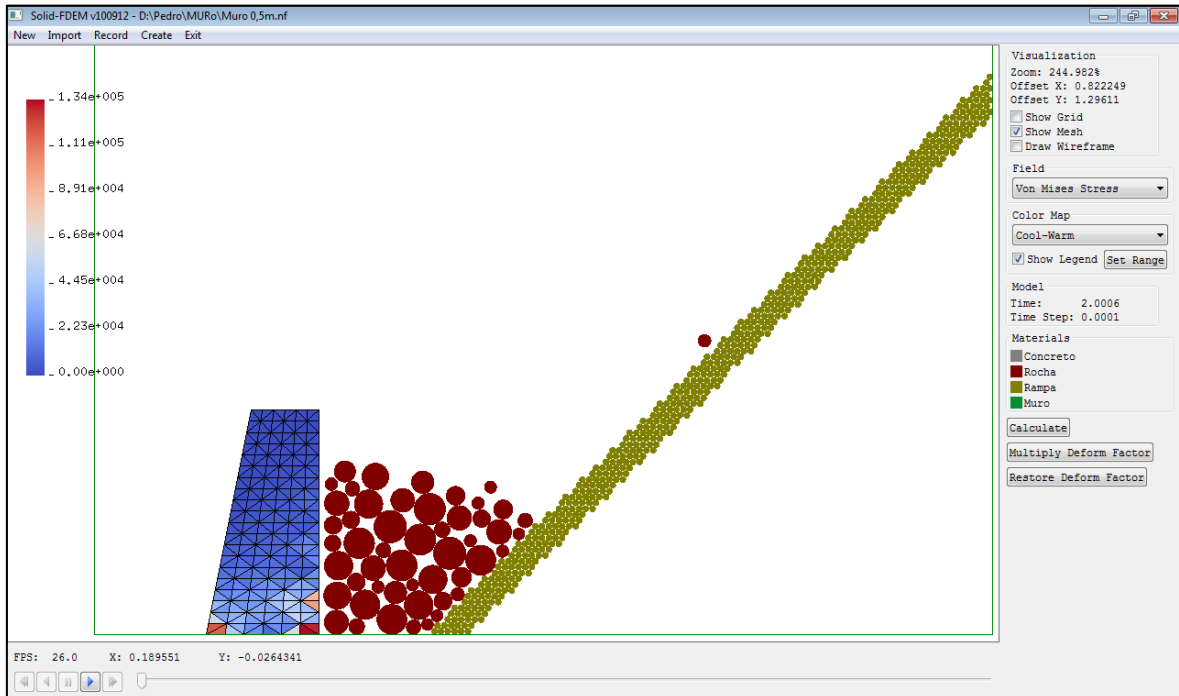


Figura 3.10: Simulação com o muro a 0,5m e blocos de 5 a 15cm em $t = 2,0s$.

As figuras 3.11 e 3.12 mostram a variação das tensões S_x , S_y , S_{xy} e de von Mises nos nós inferiores direito e esquerdo da malha de elementos finitos, respectivamente.

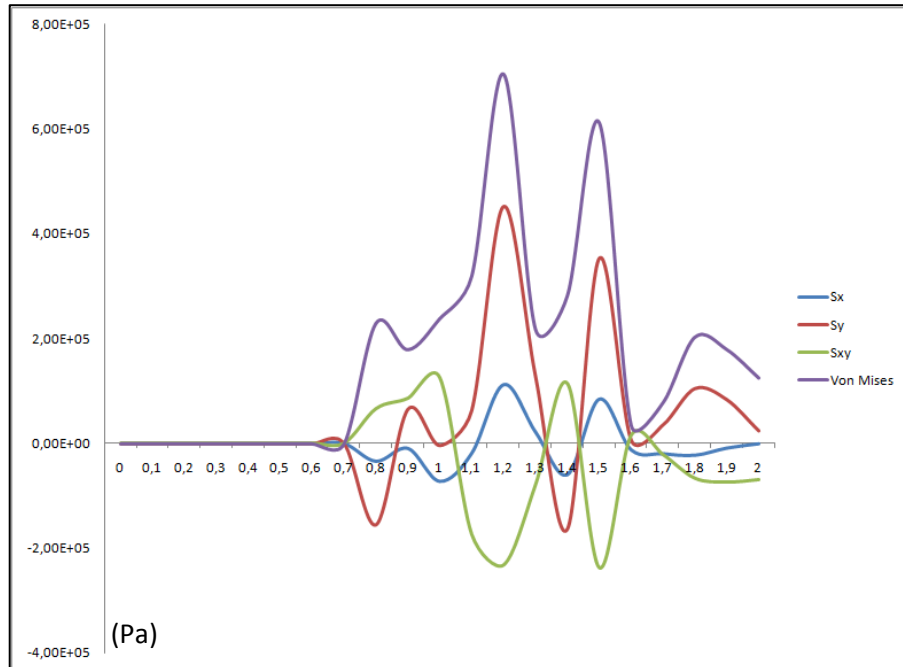


Figura 3.11: Variação das tensões ao longo de 2 segundos de simulação no nó inferior direito da malha de elementos finitos com blocos de 5 a 15cm e muro a 0,5m.

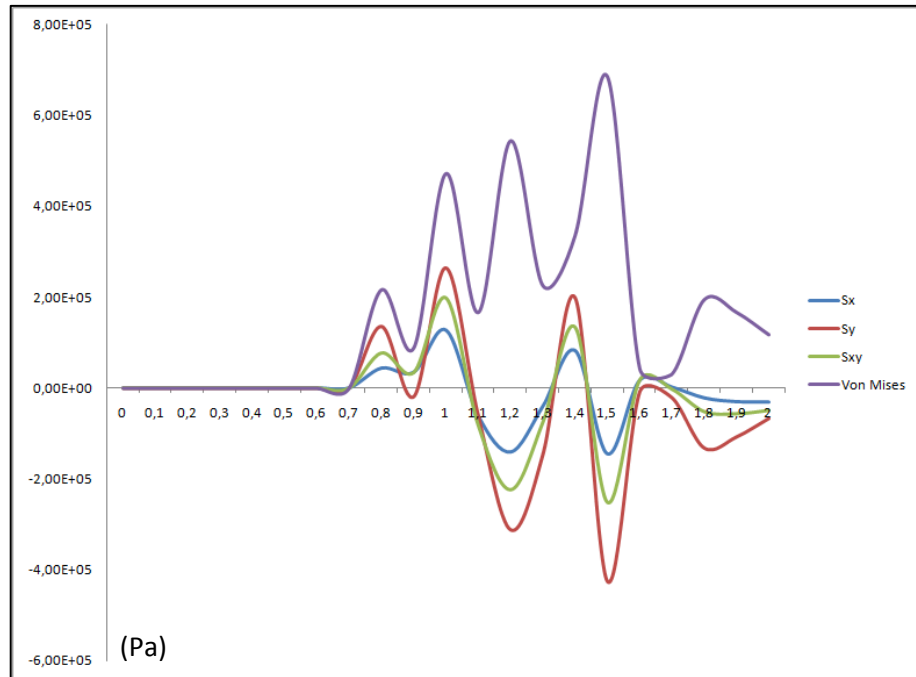


Figura 3.12: Variação das tensões ao longo de 2 segundos de simulação no nó inferior direito da malha de elementos finitos com blocos de 5 a 15cm e muro a 0,5m.

A terceira simulação foi feita com blocos de 5 a 15cm e o muro de impacto a 1 metro de distância da base do talude. O resultado pode ser visto nas figuras 3.13 a 3.16.

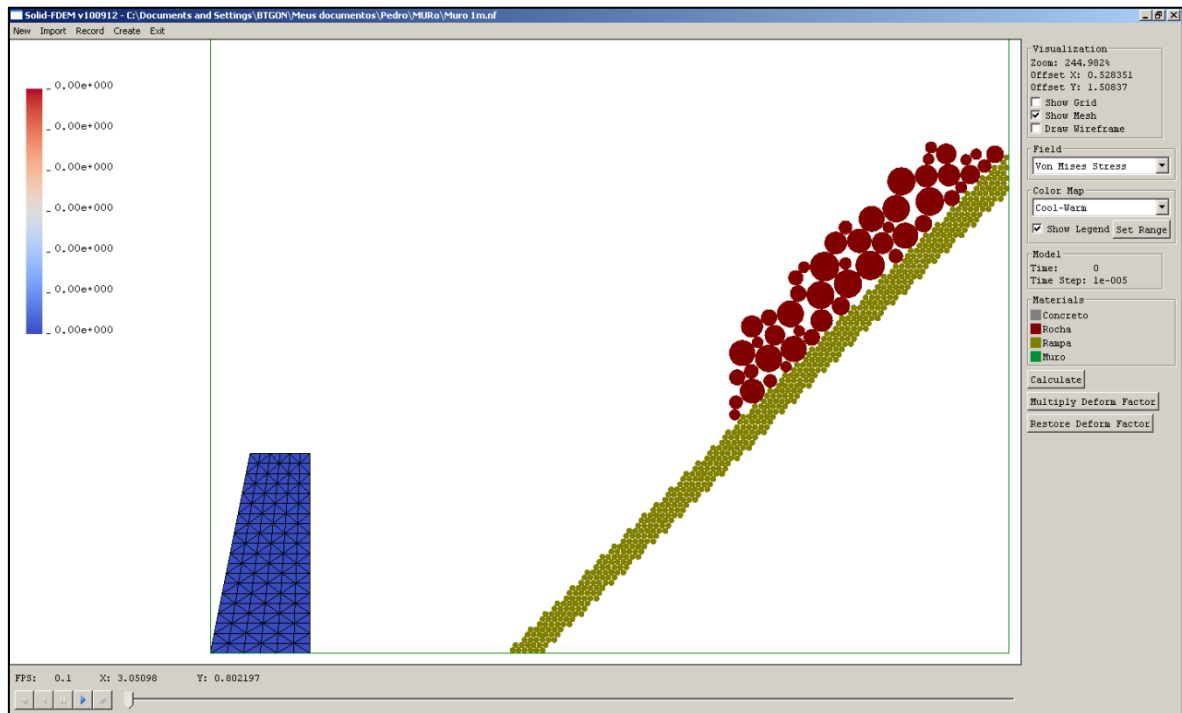


Figura 3.13: Simulação com o muro a 1m e blocos de 5 a 15cm em $t = 0s$.

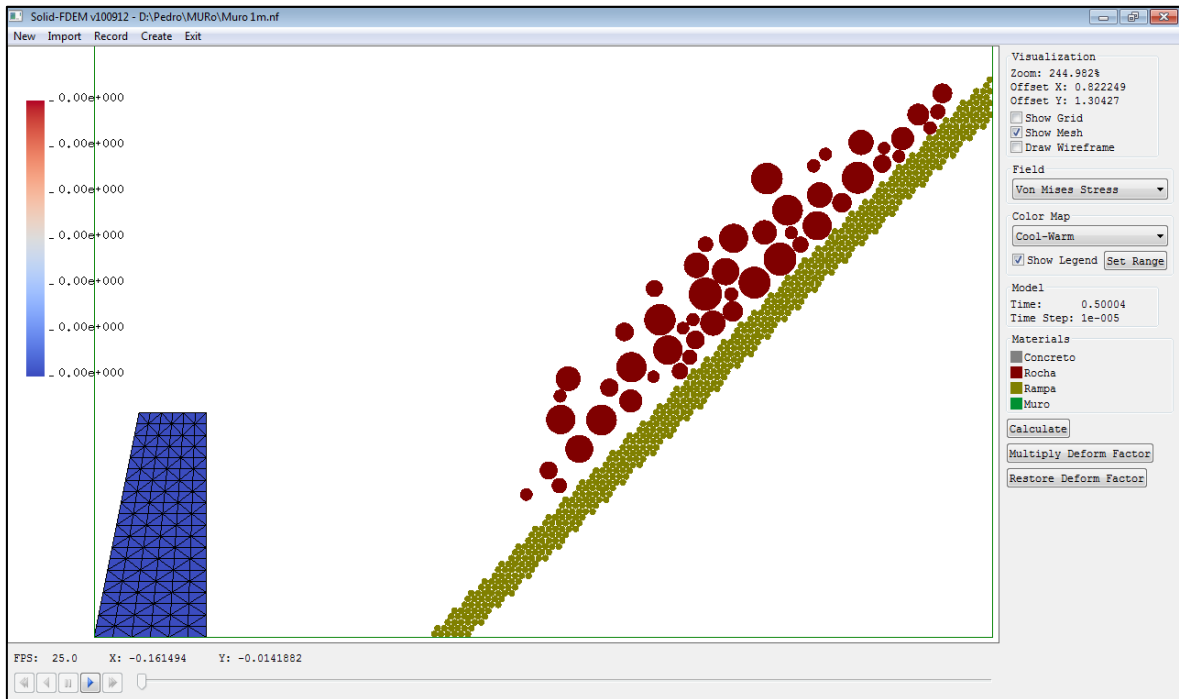


Figura 3.14: Simulação com o muro a 1m e blocos de 5 a 15cm em $t = 0,5s$.

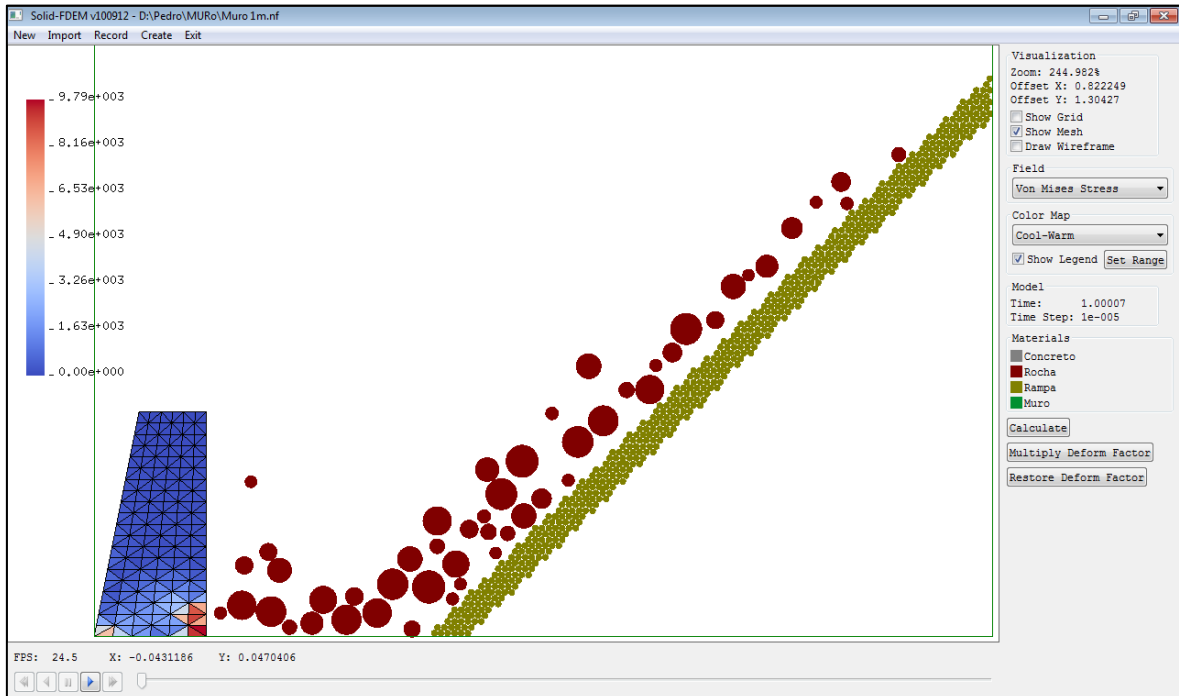


Figura 3.15: Simulação com o muro a 1m e blocos de 5 a 15cm em $t = 1s$.

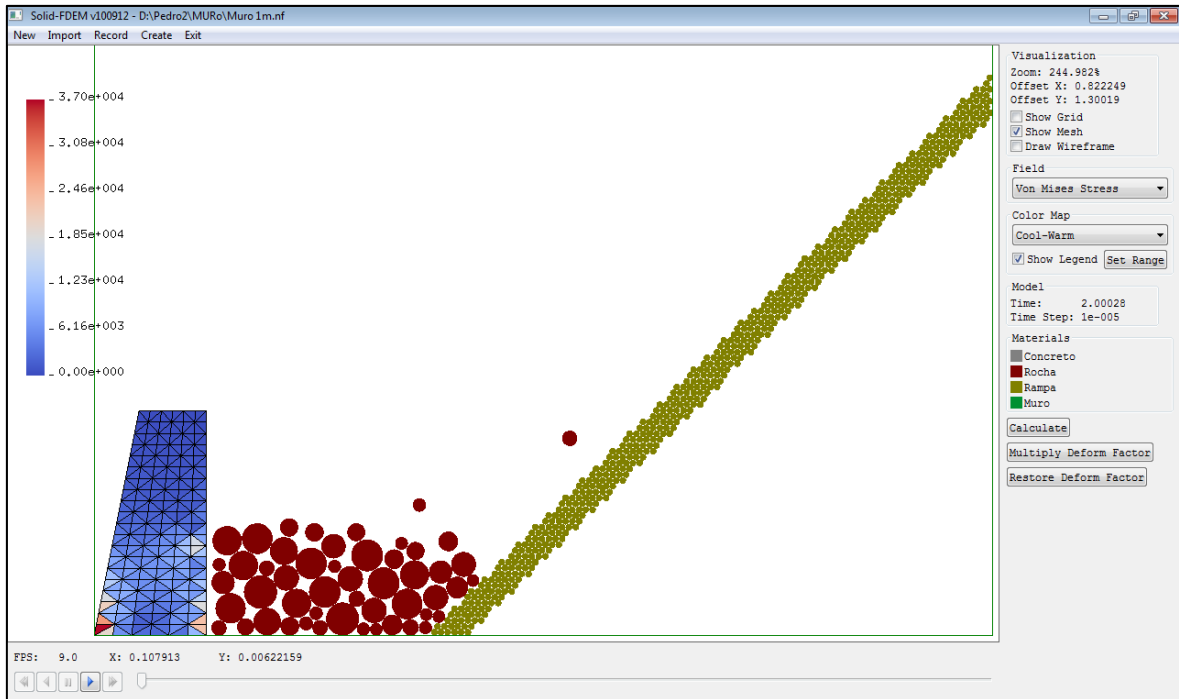


Figura 3.16: Simulação com o muro a 1m e blocos de 5 a 15cm em $t = 2s$.

As figuras 3.17 e 3.18 mostram a variação das tensões S_x , S_y , S_{xy} e de von Mises nos nós inferiores direito e esquerdo da malha de elementos finitos, respectivamente.

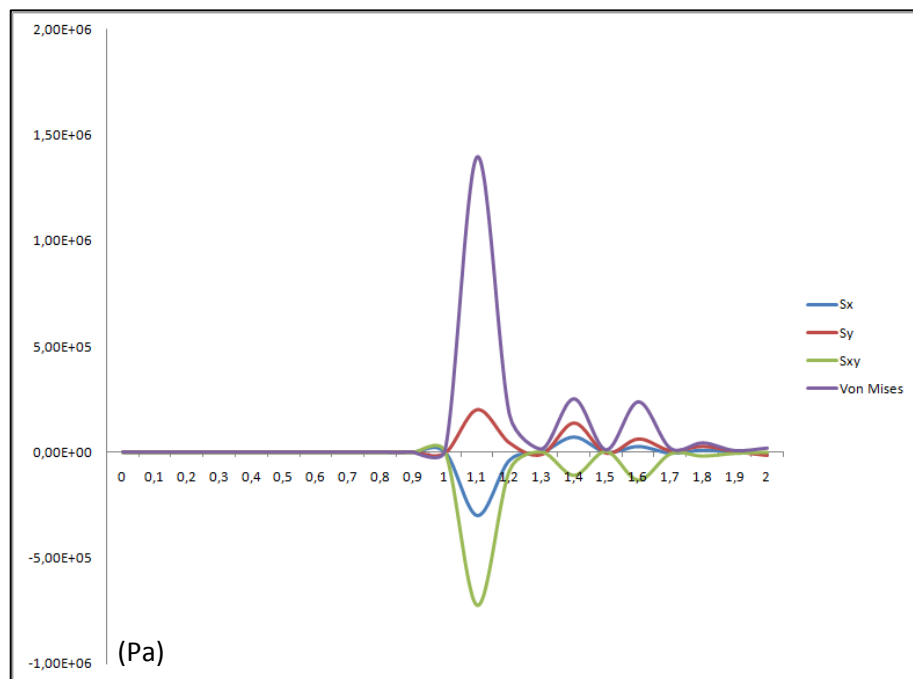


Figura 3.17: Variação das tensões ao longo de 2 segundos de simulação no nó inferior direito da malha de elementos finitos com blocos de 5 a 15cm e muro a 1m.

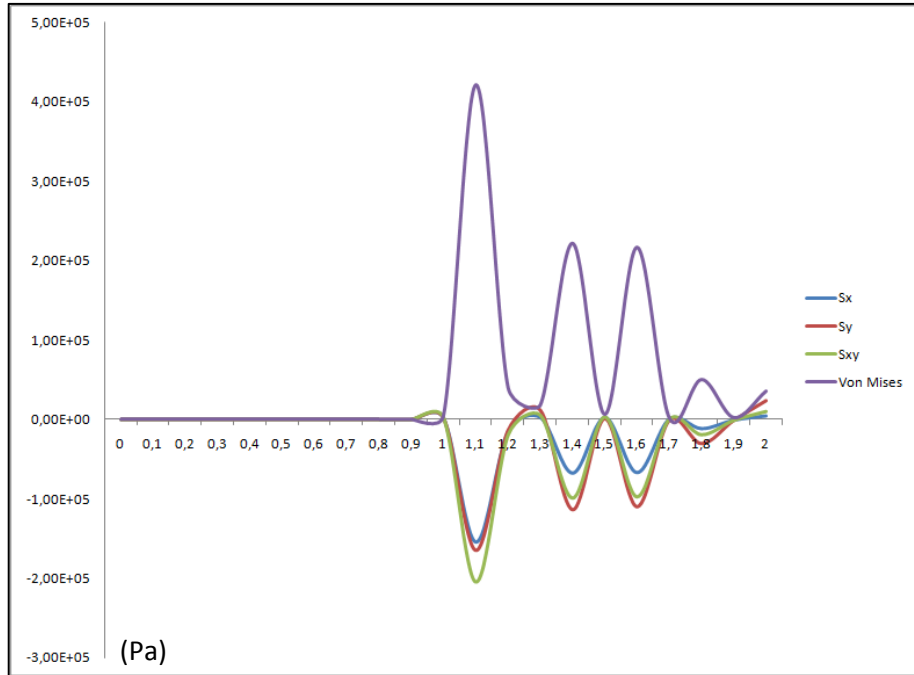


Figura 3.18: Variação das tensões ao longo de 2 segundos de simulação no nó inferior esquerdo da malha de elementos finitos com blocos de 5 a 15cm e muro a 1m.

Tabela 3: Comparação entre as máximas tensões de tração (em MPa).

	Nó inferior direito	Nó inferior esquerdo
Muro a 0,2m	1.94	0.14
Muro a 0,5m	0.45	0.26
Muro a 1m	0.2	0.01

4 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentada uma modelagem numérica para a simulação de quedas de rochas em um muro de impacto.

Conclui-se que a simulação do muro de impacto, obtida com a integração entre o Método dos Elementos Finitos e o Método dos Elementos Discretos, apresentou resultados válidos e coerentes.

Os gráficos de variação das tensões no muro de impacto mostram que no exemplo em que o muro foi colocado a distância de 0,2m da base do talude, a tração medida no nó inferior direito da malha de elementos finitos chega a 2 Mpa, que é a resistência à tração dos concretos mais comuns. Neste caso, recomenda-se utilizar concreto de alta resistência ou modificar o projeto do muro. Nos exemplos com o muro a 0,5m e 1m a tração mantêm-se suficientemente abaixo da resistência.

Nos três exemplos estudados as tensões compressivas atuantes estiveram bem abaixo do limite de resistência à compressão simples do concreto.

Os programas computacionais desenvolvidos pelo grupo responsável por essa pesquisa, VISED para a modelagem de problemas com elementos discretos e Solid-FDEM para a simulações envolvendo a integração MEF-MED, comprovaram ser úteis na simulação numérica de diversos problemas desse tipo.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT. NBR11682 – Estabilidade de Taludes. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 39 p. 1991.
- AZEVEDO, A. F. M. Método dos Elementos Finitos. 1ª ed., Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 2003.
- CHORLEY, R. J. *et al* . Geomorphology. London: Methuen & CO. Ltd. 1984.
- FERNANDES, N. F. & AMARAL, C. P. 1996. Movimentos de Massa: Uma Abordagem Geológico-Geomorfológica. *In* GUERRA, A. J. T. & CUNHA, S. B. (Orgs.) Geomorfologia e Meio-Ambiente, Editora Bertrand Brasil, p. 123-194.
- KOHLER, A. Normas para Estabilidade de Encostas. Apostilas Gratuitas, 2009. Disponível em: <http://www.apostilasgratuitas.com/construcao/76-casa-eletrica-hidraulica-etc/300-normas-para-estabilidade-de-encostas>. Acesso em: 10 de dezembro de 2010.
- MINATO, K. K., CANTINI, C. V., TEIXEIRA, M. G. Estudo e implmentação do método dos elementos discretos. 30º Congresso Ibero-Latino-Americano de Métodos Computacionais em Engenharia, Búzios, RJ, 2009.
- MUNJIZA, A. *The Combined Finite-Discrete Element Method*. John Wiley & Sons, 2004. Pöschel, T., Schwager, T. *Computational Granular Dynamics: Models and Algorithms*. Springer, 2005.
- NASCIMENTO, E. L., JÚNIOR, H. C., JÚNIOR, A. S. R. & RAMOS, V. C. L. Aplicação do Método de Elementos Discretos na Análise de Estabilidade de Taludes. CMNE/CILAMCE, Porto, Portugal, 2007.
- SORIANO, H. L. Método de Elementos Finitos em Estruturas. São Paulo: Edusp, 2003.
- SPANG, R. M. Protection Agains Rockfalls – stepchild in the design of rock slopes. Proceedings of 6th Int. Congress on Rock Mechanics, 1987.

TEIXEIRA, M. G., MINATO, K. K. & BORGES, A. F. Combined FEM-DEM: Examples of Beam-Particle Interaction. 2010.

ZIENKIEWICKS, O. C. & TAYLOR, R. L. The Finite Element Method, volume II. McGraw Hill, 1991.